

УДК 551.324.43

Баланс массы льда ледникового купола Беллинсгаузен в 2007–2012 гг. (о. Кинг-Джордж, Южные Шетландские острова, Антарктика)

© 2014 г. Б.Р. Мавлюдов

Институт географии РАН, Москва

*bulatrm@bk.ru**Статья поступила в печать 26 августа 2013 г.*

Абляция, аккумуляция, баланс массы ледников, изменение климата, Субантарктика.
Ablation, accumulation, climate change, glacier mass balance, Subantarctic.

Масс-балансовые измерения на ледниковом куполе Беллинсгаузен проводились в течение пяти летних сезонов 2007–2012 гг. и одного зимнего в 2011 г. Анализ полученных данных показал, что в 2007/08, 2008/09 и 2011/12 гг. баланс массы льда на куполе был отрицательным, а в 2009/10 и 2010/11 гг. – положительным. Высота границы питания в 2007/08 и 2008/09 гг. располагалась несколько ниже вершины ледникового купола (около 225 м над ур. моря), в 2009/10 г. она опустилась практически до уровня моря, в 2010/11 г. проходила на высоте 180 м над ур. моря, а в 2011/12 г. – около 220 м. Хорошая связь таяния снега и льда со средней летней температурой воздуха позволила восстановить условия таяния на куполе и баланс массы льда по данным метеостанции Беллинсгаузен за весь период наблюдений (1969–2011 гг.). Анализ полученных данных позволяет предположить, что в последние годы наметилась тенденция к похолоданию климата.

Введение

В связи с глобальным изменением климата важно знать, как реагирует на него оледенение в разных регионах мира. Один из интересных объектов – о. Кинг-Джордж, самый крупный остров в архипелаге Южных Шетландских островов Антарктики (рис. 1). Территория острова примерно на 95% покрыта ледниками, его оледенение чутко реагирует на любые изменения климата в этом регионе. В юго-западной части о. Кинг-Джордж, на п-ове Файлдс, на российской станции Беллинсгаузен есть метеостанция, наблюдения на которой начались в 1968 г. По данным метеостанции за 1968–2011 гг. температура повысилась приблизительно на 1 °C [11].

Мы проводили исследования на ледниковом куполе Беллинсгаузен, который находится в западной части о. Кинг-Джордж, в северо-восточной части п-ова Файлдс. С трёх сторон ледниковый купол заканчивается на суше (на высотах от 0 до 50 м над ур. моря), а на северо-востоке соединяется с другими ледниковыми куполами острова (см. рис. 1). Максимальная высота купола – 250 м, его размеры с юго-запада на северо-восток составляют 3 км, с юго-востока на северо-запад – 4 км. На востоке пологая поверхность купола (около 10°) становится довольно крутой (до 20°), а на краю купола местами формируется ледяной обрыв, высотой до 15–20 м.

Особенности накопления и таяния снега на ледниковом куполе исследовали специалисты ещё

первых Советских Антарктических экспедиций 1968–1970 гг. [4, 9]. По профилю, соединяющему юго-западную часть ледникового купола и его вершину (14 реек), измеряли толщину и плотность снега. На вершине купола находилась снегомерная площадка, размером 100 × 100 м, на которой было установлено 28 реек. Исследования показали, что снег вдоль профиля распределяется неравномерно, вне зависимости от абсолютной высоты места. В 1990-х годах исследования аккумуляции и абляции снега примерно по тому же профилю вели китайские учёные [21], они тоже не обнаружили высотной зависимости распределения снега на леднике. На ледниковом куполе также выполнялись геофизические работы [3, 8, 20 и др.] и изучалось таяние снега и льда [14].

Задача данного исследования – определить баланс массы льда на ледниковом куполе Беллинсгаузен и его изменчивость во времени. В качестве опорного объекта выбран ледниковый купол Беллинсгаузен, находящийся в 4 км от одноименной научной станции.

Методика работ

Для оценки особенностей залегания снежного покрова на всём ледниковом куполе в период максимума снегонакопления в начале ноября каждого года проводилась площадная снегомерная съёмка. Точки измерения располагались на субмеридиональных профилях с интервалом 250 м,

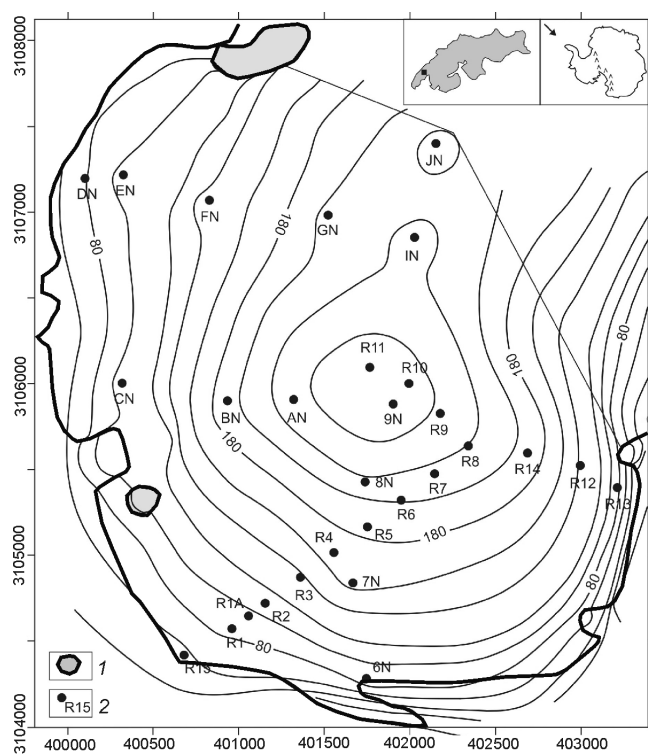


Рис. 1. Положение абляционных реек на ледниковом куполе Беллинсгаузен.

1 – нунатаки; 2 – абляционные рейки; на врезке показано положение купола на о. Кинг-Джордж; система координат UTM (21 зона)

Fig. 1. Position of ablation stakes on Bellingshausen Ice Dome. 1 – nunataks; 2 – ablation stakes; on insert – position of King George Island; UTM coordinate system (21 zone)

профили отстояли друг от друга также на 250 м. В каждой точке три раза измеряли толщину снега (точность отсчёта $\pm 0,5$ см) и затем вычисляли среднее значение. Для каждой точки записывались координаты, абсолютная высота (по данным GPS) и толщина снега. Это позволило, используя программу SURFER, картографировать результаты измерений. Для оценки снегозапаса (см. <http://meteorologist.ru/zapas-vodyi-v-snezhnom-pokrove.html>) ежегодно в начале ноября в снеге до ледяной поверхности проходились шурфы. В них с помощью стандартного снегомера ВС-43 измерялась плотность снега, а с помощью электронного термометра GTN-175 – его температура с точностью около $0,1$ °C. В шурфах документировали структуру снега по стандартной методике.

Для измерения толщины снега на куполе использовали снегомерный шуп, длиной 290 см. Толщину снега измеряли вблизи абляционных реек, установленных нами на куполе Беллинсгаузен в начале ноября 2007 г., и по рейкам, ранее постав-

ленным германскими гляциологами (всего 29 реек, см. рис. 1). В начале ноября снег имеет максимальную толщину, отрицательную температуру, и наложенный лёд в его основании ещё не формируется. В тех случаях, когда рейка оказывалась погребённой снегом, его толщину измеряли в окрестностях точки, координаты которой определяли по GPS-данным. Абляционные рейки представляли собой деревянные или бамбуковые жерди, длиной от 2,3 до 3,5 м, их устанавливали в скважинах, глубиной 1 м. После вытаивания рейки её вновь забуривали в том же месте. Плотность снега измерялась у реек R1, R4, R8, R11 и EN через 7–14 дней.

Результаты наблюдений

Аккумуляция. Результаты измерений толщины снежного покрова приведены в табл. 1. Минимальная толщина снега (117,5 см) отмечена в ноябре 2008 г., а максимальная – в ноябре 2010 г. (193,7 см). В 2007–2009 гг. снег на ледниковом куполе Беллинсгаузен стаивал почти полностью, а в конце сезона абляции 2010 г. почти вся поверхность купола оставалась под снегом (средняя толщина снега по рейкам на конец сезона абляции составила 74 см). Поэтому максимальные значения толщины снега в ноябре 2010 г. связаны не с обильными снегопадами зимой этого года, а с суммированием толщины свежего снега с перелетовавшим остатком. В 2011 г. этот процесс частично повторился. Из табл. 1 также видно, что средние значения толщины снежного покрова, полученные по результатам снегомерных съёмок и по данным измерения толщины снега у абляционных реек, почти совпадают; разница значений за период наблюдений не превышает 5%. Это означает, что для оценки толщины снежного покрова на ледниковом куполе Беллинсгаузен можно использовать лишь абляционные рейки.

По данным снегомерных съёмок на ледниковом куполе Беллинсгаузен были построены карты (рис. 2). На них видно, что к югу от вершины купола протянулась субширотная полоса, шириной до 700 м, с повышенной толщиной снега. Вероятно, эта полоса соответствует субширотной зоне трещин, которые начинают просматриваться в этой части купола при максимальном стаивании снега в конце сезона абляции. К северу и югу от этой полосы расположены полосы пониженной снежности: к югу – шириной до 500 м; к северу – шириной 500–700 м. Пониженная снежность отмечается также в субмеридиональной полосе, шириной до 700–800 м, в северо-западной части купола. Есть

Таблица 1. Данные снегомерных съёмок на максимум снегонакопления на ледниковом куполе Беллинсгаузен в 2007–2011 гг.

Год	Число точек снегосъёмки	Толщина снега по снегосъёмке, см			Коэффициент вариации	Средняя плотность снега, г/см ³	Число реек	Толщина снега по рейкам, см	Разность толщины снега, %
		min	max	средняя					
2007	204	80	> 290	160,0	0,30	0,409	12	152,0	5
2008	181	56	> 300	117,5	0,40	0,481	28	117,3	0,17
2009	152	58	> 290	170,7	0,33	0,469	29	161,8	5,2
2010	206	61	> 300	193,7	0,33	0,534	29	193,4	0,15
2011	208	58	360	169,84	0,46	0,512	29	166,52	1,95
Среднее	—	62,6	> 308	162,35	0,36	0,481	—	158,2	2,5

и другие совпадения, позволяющие предположить, что эти полосы соответствуют особенностям структуры поверхности ледникового купола, которая, в свою очередь, определяется подлёдным рельефом.

К другой особенности накопления снега на ледниковом куполе Беллинсгаузен относится распределение снега вдоль краевых морен, опоясывающих купол с юга и запада. Почти во все периоды наблюдений толщина снега возрастала при приближении к моренам. Лишь в 2008 г. такой рост наблюдался не столь отчётливо. Скорее всего, это связано с особенностями выпадения и метелевого переноса снега на ледниковом куполе. Высотную зависимость накопления снега по данным снегомерных съёмок установить не удалось.

Для снежной толщи на ледниковом куполе характерно большое число ледяных прослоек, появление которых связано с многочисленными потеплениями в холодный период. Кроме того, отмечается утолщение этих прослоек в начале периода абляции из-за намерзания на них талых вод, поступающих с поверхности снега. Измерения в шурфах показали, что льдистость снежной толщи в отдельные годы может достигать 33% её толщины (в водном эквиваленте — в.э.). Эта льдистость во многом ограничивает перевевание снега на ледниковом куполе. По-видимому, меньше всего снег на куполе перемещается в тёплые зимы.

Таяние снега и льда. Первые исследования таяния снега и льда на куполе Беллинсгаузен выполнены в 1968–1970 гг. [2, 4, 9]. Летом 1979/80 г. гляциологические исследования на куполе проведены Б.И. Втюриным [1], в дальнейшем эти процессы исследовали китайские (в 1985–1992 гг.) [21] и германские (в 1997/98 и 1999/2000 гг.) учёные [14]. Наши исследования охватывают пять летних сезонов — с 2007/08 до 2011/12 гг. В первые два сезона наблюдения покрывали не весь период абляции, но в последующем они его полностью перекры-

ли. Недостающие сведения по таянию снега и льда были в последующем частично восстановлены.

Таяние снега. Наблюдения по рейкам показали, что интенсивность таяния снега и льда снижается с увеличением высоты купола на склонах всех экспозиций. Ранее была установлена репрезентативность данных о толщине снега, полученных по абляционным рейкам [5]. Мы полагаем, что эти данные репрезентативны для всех сезонов года. Из рис. 3 видно, что ход изменения толщины снега на куполе Беллинсгаузен по всем кривым одинаков — на протяжении сезона абляции толщина снега неуклонно уменьшается. Однако можно выделить две группы кривых: 1) 2008/09, 2009/10 и 2011/12 гг.; 2) 2007/08 и 2010/11 гг. В каждой группе кривые таяния снега практически параллельны, однако результат таяния неодинаков. В первой группе снег на куполе исчезал практически полностью, а в другой — только частично. Это зависело от средней летней температуры, продолжительности периода абляции, интенсивности летних снегопадов, а также начального количества снега. По годам на всём ледниковом куполе среднее таяние снега (в водном эквиваленте) составило: 2007/08 г. — 56,8 см, 2008/09 г. — 56,2 см, 2009/10 г. — 40,3 см, 2010/11 г. — 77,6 см, 2011/12 г. — 69,3 см, а в среднем за пять сезонов — 60,0 см. Как видим, таяние снега на куполе Беллинсгаузен меняется год от года не очень существенно.

Таяние наложенного льда. Наложённый лёд, по определению, формируется в начале периода абляции в основании снежной толщи на поверхности ледникового льда при замерзании талых вод, просачивающихся сквозь снег, за счёт запаса холода внутри льда. Средняя толщина наложенного льда на куполе Беллинсгаузен в разные годы составила: 2008 г. — 19,8 см (248 измерений), 2009 г. — 16,0 см (107 измерений), 2010 г. — 15,6 см (76 измерений), 2011 г. — 38,9 см (53 измерения), 2012 г. — 30,3 см (20 измерений). Согласно среднему значению из

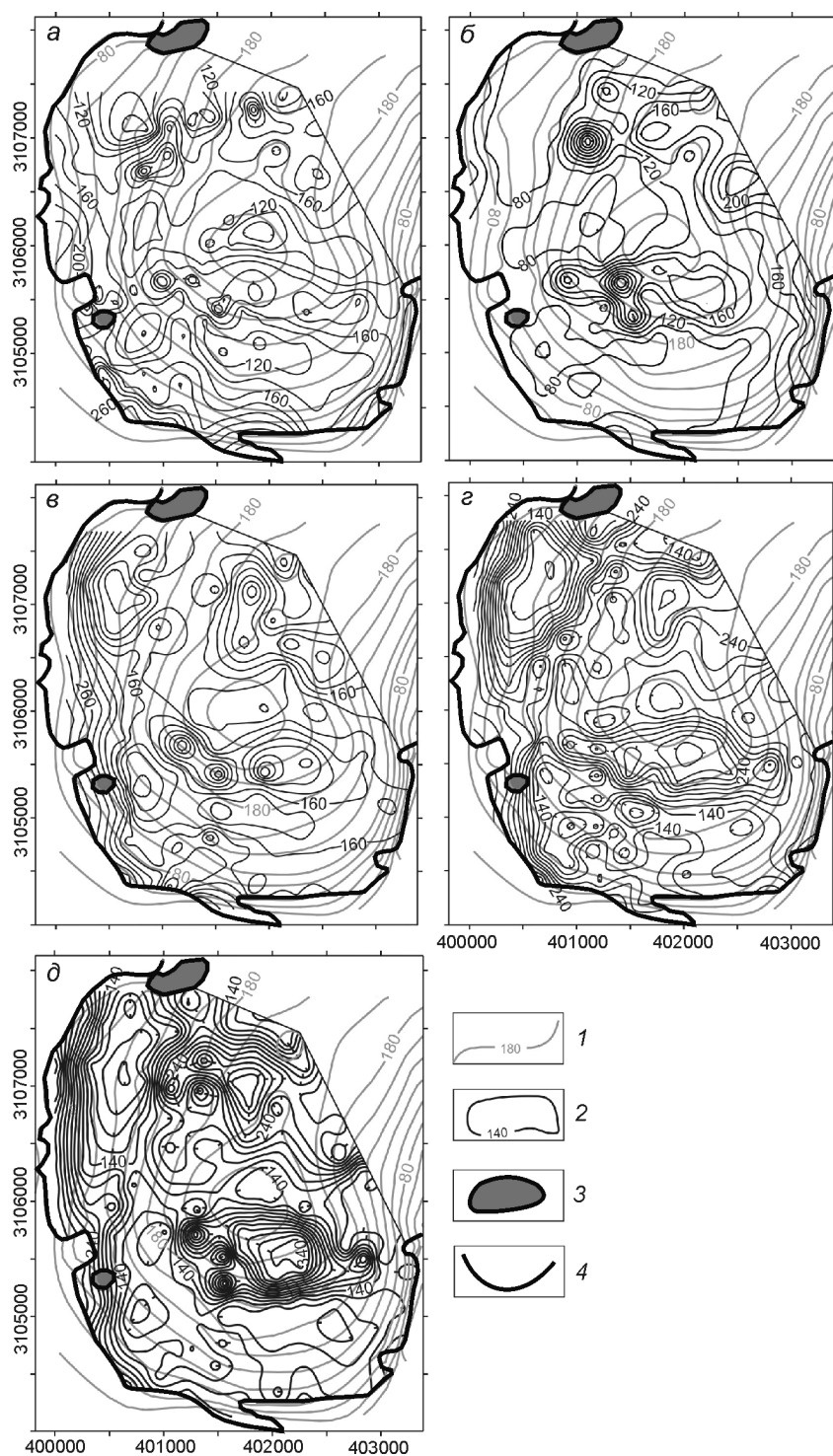


Рис. 2. Карты толщины снега на поверхности ледникового купола Беллинсгаузен: а – 2007 г.; б – 2008 г.; в – 2009 г.; г – 2010 г.; д – 2011 г.; 1 – горизонтали (сечение 20 м); 2 – изолинии толщины снега (сечение изолиний 20 см); 3 – нунатаки; 4 – границы купола; система координат UTM (21 зона)

Fig. 2. Maps of snow thickness on the surface of Bellingshausen Ice Dome:

а – 2007; б – 2008; в – 2009; г – 2010; д – 2011; 1 – contour lines of Dome relief (distance between contour lines 20 m); 2 – contour lines of snow thickness (distance between contour lines 20 cm); 3 – nunataks; 4 – boundaries of ice dome; UTM coordinate system (21 zone)

97 измерений в 2009 г., плотность наложенного льда равна $0,82 \text{ г/см}^3$.

На поверхности наложенного льда после полного стаивания снега возникала кора таяния, напоминающая снег, подверженный фирнизации. Из-за высокого значения альбедо коры таяния наложенный лёд стаивал медленно, и на склоне лед-

никового купола между ледниковым льдом и границей снега возникала полоса наложенного льда, шириной в сотни метров. Очевидно, что слой наложенного льда под сохранившимся после лета снежным покровом наращивает толщу ледникового льда. В 2007/08 и 2008/09 гг. наложенный лёд на куполе Беллинсгаузен стоял почти полно-

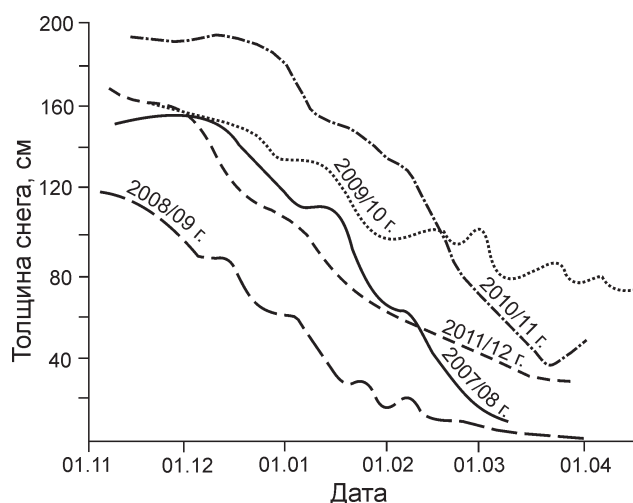


Рис. 3. Кривые изменения средней толщины снежного покрова в течение периода абляции на ледниковом куполе Беллинсгаузен в разные годы

Fig. 3. Curves of average snow thickness changing during ablation period on Bellingshausen Ice Dome in different years

стью, в 2009/10 г. он сохранился пятнами в южной и северо-западной частях купола до высот около 170 м, а в 2010/11 и 2011/12 гг. — в среднем до высоты 180 м. По данным речных наблюдений, на куполе стояло следующее количество наложенного льда (в в.э.): 2007/08 г. — 8,8 см, 2008/09 г. — 9,3 см, 2009/10 г. — 0,7 см, 2010/11 г. — 8,7 см, 2011/12 г. — 14,4 см. Как видим, за исключением холодного сезона 2009/10 г., когда к концу сезона абляции снег сохранился почти на всей поверхности купола, таяние наложенного льда было примерно одинаковым и колебалось около 9 см в.э. Лишь летом 2012 г. стаивала толща наложенного льда, накопившаяся за три года.

Таяние ледникового льда. В последние годы ледниковый лёд таял только по периферии ледникового купола, но весьма неравномерно на разных склонах и в разные годы. Согласно речным наблюдениям, в среднем на всём куполе стаивало следующее количество ледникового льда (в.э.): 2007/08 г. — 8,0 см, 2008/09 г. — 60,4 см, 2009/10 г. — 1,6 см, 2010/11 г. — 7,8 см, 2011/12 г. — 22,9 см, а в среднем за пять сезонов абляции — 20,1 см. Как видим, 2007/08 и 2010/11 гг. характеризуются пониженным таянием ледникового льда, в 2011/12 г. отмечалось его среднее таяние, а в 2008/09 и 2009/10 гг. — весьма интенсивное (табл. 2).

Таяние снега и льда на ледниковом куполе различно и по доле вклада составляющих частей. Так, вклад таяния снега в общее таяние на куполе составляет от 44,6 до 94,6% (в среднем 72,8%), на-

Таблица 2. Таяние снега и льда на куполе Беллинсгаузен*

Год	Снег	Лёд		Сумма
		наложенный	ледниковый	
2007/08	56,8/77,2	8,8/12	8,0/10,8	73,6/100
2008/09	56,2/44,6	9,3/7,4	60,4/48	125,9/100
2009/10	40,3/94,6	0,7/1,6	1,6/3,8	42,6/100
2010/11	77,6/82,5	8,7/9,2	7,8/8,3	94,1/100
2011/12	69,3/65,0	14,4/13,5	22,9/21,5	106,6/100
Среднее	60,0/72,8	8,4/8,7	20,1/18,5	88,6/100

*В числителе — в см в.э., в знаменателе — в %.

Таблица 3. Баланс массы льда на куполе Беллинсгаузен в 2007–2012 гг., см в.э.

Год	Аккумуляция	Абляция	Баланс
2007/08	65,44	–73,6	–8,16
2008/09	56,52	–125,9	–69,38
2009/10	80,06	–42,6	37,46
2010/11	103,44	–94,1	9,34
2011/12	70,95	–113,9	–42,9
Среднее	75,28	–90,0	–14,73

ложенного льда — от 1,6 до 12% (в среднем 8,7%), а ледникового льда — от 3,8 до 48% (в среднем 18,5%). В среднем за 2007–2012 гг. на ледниковом куполе стаивало 88,6 см в.э. (от 42,6 до 125,9 см).

Баланс массы льда. Как видно из табл. 3, баланс массы льда на ледниковом куполе в течение последних пяти лет изменялся в широких пределах: от –69,38 до 37,46 см в.э. При этом в 2009/10 и 2010/11 гг. впервые за долгие годы наблюдался положительный баланс массы льда. Несмотря на большую разницу в балансе массы льда в 2007/08 и 2008/09 гг., высота границы питания в оба этих года оставалась примерно на одном уровне — около 225 м над ур. моря. Это означает, что различия в балансе массы льда обусловлены, главным образом, различной интенсивностью таяния льда в нижней части ледникового купола.

Обсуждение

Состояние оледенения любого региона зависит от изменений температуры воздуха, количества и вида выпадающих осадков. На о. Кинг-Джордж в течение всего периода наблюдений (с 1968 г.) отмечен положительный тренд как средних годовых, так и средних летних (XII, I, II) и зимних (VI–VIII) температур воздуха [5, 10]. За время наблюдений зимние (III–XI) и годовые осадки имеют отрица-

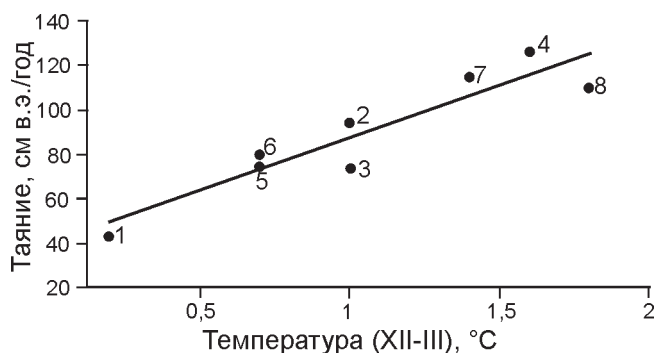


Рис. 4. Связь таяния на ледниковом куполе со средней летней температурой воздуха (XII–III) на метеостанции Беллинсгаузен (2007–2011 гг.).

Данные: 1–4 – автор; 5 – по [13]; 6 – по [21]; 7, 8 – по [14]

Fig. 4. Correlation between melting on the ice cap and mean air summer temperature (XII–III) on meteorological station Bellingshausen (2007–2011).

Data: 1–4 – author; 5 – from [13]; 6 – from [21]; 7, 8 – from [14]

тельный тренд, а летние (XII, I, II) – слабый положительный [5, 11]. Рост количества летних (в основном жидких) осадков способствует таянию снега и льда, а уменьшение зимних (главным образом твёрдых) приводит к сокращению количества снега, накапливающегося на острове. Совокупность создавшихся условий неблагоприятна для развития оледенения в будущем. Однако всё это верно для метеостанции Беллинсгаузен, расположенной на высоте 14 м над ур. моря в центральной части п-ова Файлдс. На склонах ледникового купола Беллинсгаузен наблюдается иная картина из-за высотного градиента изменения температуры воздуха и температурного скачка между грунтовой и ледниковой поверхностями.

Чтобы понять, почему разброс значений таяния снега и льда так велик, мы сравнили суммарное таяние снега и льда на куполе со средней летней температурой воздуха на метеостанции Беллинсгаузен. Если считать среднюю летнюю температуру воздуха по трём летним месяцам (XII–II), то среднеквадратическое отклонение осредняющей прямой не очень велико ($R^2 = 0,75$), а при осреднении температуры по четырём месяцам (XII–III) коэффициент корреляции ($R^2 = 0,86$) существенно повышается (рис. 4). Поэтому для дальнейших расчётов мы выбрали осреднение температуры воздуха за летний период по четырём месяцам. Из рис. 4 видно, что величина общего таяния снега и льда на куполе практически линейно зависит от средней летней температуры воздуха. К аналогичному выводу пришли и испанские исследователи, изучавшие баланс массы лед-

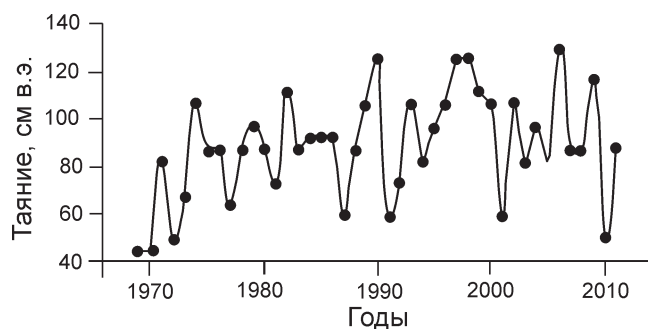


Рис. 5. Восстановленные значения таяния снега и льда на ледниковом куполе Беллинсгаузен в 1969–2011 гг. [6]

Fig. 5. Reconstructed data of snow and ice melting on Bellingshausen Ice Dome in 1969–2011 [6]

ников на о. Ливингстон, расположенном в том же архипелаге [16, 18].

На основе наших данных мы получили связь между таянием снега и льда на куполе Беллинсгаузен и средней летней температурой воздуха:

$$A = 47,49t + 39,69,$$

где A – осреднённое таяние снега и льда на куполе, см в.э.; t – средняя летняя температура воздуха (XII–III) на метеостанции Беллинсгаузен, °C.

Используя эту зависимость и данные о средних месячных температурах воздуха на станции Беллинсгаузен за разные годы [11], можно рассчитать величины осреднённого таяния снега и льда на куполе Беллинсгаузен в течение всего периода наблюдений, т.е. с 1969 по 2011 г. Из рис. 5 видно, что, несмотря на ежегодные колебания величины таяния снега и льда, в пределах всей кривой можно условно выделить три довольно устойчивых периода: 1) с 1969 по 1985 г. годовое таяние на куполе возрастало от 50 до 100 см в.э.; 2) с 1986 по 2006 г. таяние колебалось около 100 см в.э.; 3) с 2006 по 2011 г. таяние вновь начало уменьшаться.

Наши данные по аккумуляции (см. табл. 1) дают среднее значение за период наблюдений около 78 см в.э. в год. Материалы других исследователей показывают, что в 1990-х годах годовая аккумуляция на куполе составляла около 65 см в.э. [21], а в 1970-х годах – 60 см в.э. [4, 19]. Если предположить, что изменение величины накопления снега на куполе Беллинсгаузен в среднем происходило линейно, то получим такую зависимость:

$$K = 0,375x - 679,58,$$

где K – аккумуляция, см в.э.; x – год (с 1969 по 2011 г.).

Используя эти данные и результаты вычисления абляции на ледниковом куполе за тот же пери-

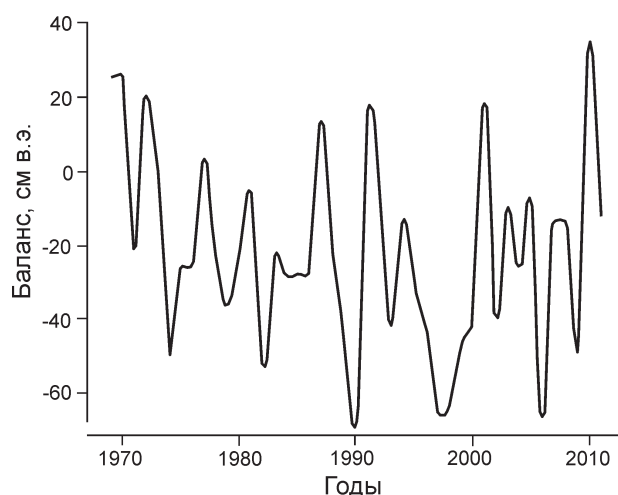


Рис. 6. Изменение баланса массы льда ледникового купола Беллинсгаузен во времени

Fig. 6. Ice mass balance changing on Bellingshausen Ice Dome in time

од времени (см. рис. 5), мы получили значения баланса массы льда для периода 1969–2011 г. (рис. 6). По форме полученный график несколько отличается от графика таяния (см. рис. 5). На рис. 6 видно, что отрицательный баланс начал преобладать примерно с середины 1970-х годов, после чего он стабилизировался на некотором отрицательном уровне. С определёнными колебаниями эта ситуация продолжалась до конца 2000-х годов, после чего, в 2009 г., баланс вновь стал положительным.

Теперь рассмотрим характер изменения высоты границы питания на ледниковом куполе. На рис. 7 видно, что с 1970-х до начала 1990-х годов высота границы питания мало меняется и находится на уровне 150 м. В дальнейшем, вплоть до 2006 г., она поднимается и достигает высоты 260 м, т.е. находится чуть выше вершины ледникового купола, и тем самым весь купол оказывается в области абляции. В последующие годы высота границы питания опять стала понижаться и испытывала колебания в пределах высот ледникового купола.

Наши результаты оказались схожими с данными, полученными для ледников о. Ливингстон (Южные Шетландские острова) [18]. Сравнение данных последних лет по изменению высоты границы питания на ледниковом куполе Беллинсгаузен [17] и на ледниках Шпицбергена [7] показывает достаточно устойчивое понижение высоты границы питания ледников начиная с 2006 г. На основе изучения 194 ледников на севере Антарктического полуострова в работе [15] сделан вывод, что в 2001–2009 гг. по сравнению с 1988–2001 гг.

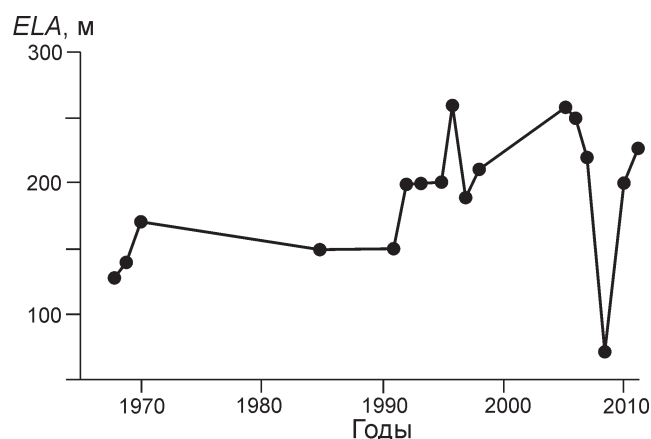


Рис. 7. Изменение высоты границы питания (ELA) на ледниковом куполе Беллинсгаузен.

Использованы данные [4, 6, 14, 19, 21]

Fig. 7. Equilibrium Line Altitude (ELA) changing on Bellingshausen Ice Dome.

Data from [4, 6, 14, 19, 21]

число отступающих ледников сокращается. Намечившаяся тенденция к похолоданию климата подтверждается информацией в работах [10, 12]. Будущее покажет, перерастёт ли эта тенденция в полноценное похолодание климата.

Заключение

Обработка данных площадных снегомерных съёмок, проведённых в максимум снегонакопления в 2007–2011 гг., позволила установить характер распределения снега на поверхности ледникового купола Беллинсгаузен на о. Кинг-Джордж в Южных Шетландских островах (Антарктика). Исследована также динамика абляции за этот период и рассчитан баланс массы льда на куполе Беллинсгаузен. Выяснено, что в 2007/08, 2008/09 и 2011/12 гг. баланс массы льда на куполе был отрицательным, а в 2009/10 и 2010/11 гг. — положительным. Высота границы питания за период наблюдений претерпела существенные изменения — от 0 до 225 м над ур. моря. Таяние снега и льда на ледниковом куполе в значительной степени связано со средней летней температурой на метеостанции Беллинсгаузен, рассчитанной по четырём летним месяцам (XII–III). Это позволило восстановить характер изменения таяния снега и льда на куполе за весь период наблюдений. Удалось построить график изменения баланса массы льда для ледникового купола Беллинсгаузен на весь период наблюдений (с 1969 по 2011 г.) и сделать предварительный вывод, что в конце 2000-х годов в Субантарктике наметилась тенденция к похолоданию.

Благодарности. Автор выражает благодарность руководству РАЭ за предоставленную возможность проведения полевых работ по изучению накопления и таяния снега и льда на ледниковом куполе Беллинсгаузен о. Кинг-Джордж в летние сезоны 2007/08–2011/12 гг. и зимний сезон 2011 г.

Литература

1. Втюрин Б.И. Полевые гляциологические и геокриологические исследования на острове Кинг-Джордж в 25 Советской Антарктической экспедиции // МГИ. 1980. № 39. С. 30.
2. Говоруха Л.С. Симонов И.М. Географические исследования на острове Кинг-Джордж // Информ. бюл. САЭ. 1973. № 85. С. 8–15.
3. Говоруха Л.С., Чудаков В.И., Шалыгин А.М. Радиолокационное зондирование ледникового покрова на острове Кинг-Джордж // Информ. бюл. САЭ. 1974. № 89. С. 15–18.
4. Заморюев В.В. Результаты гляциологических наблюдений на станции Беллинсгаузен в 1968 г. // Тр. САЭ. 1972. № 55. С. 135–144.
5. Мавлюдов Б.Р. Особенности снегонакопления на куполе Беллинсгаузен, остров Кинг-Джордж // Состояние природной среды Антарктики: Квартальный бюл. СПб.: РАЭ, 2010. № 4 (53). С. 68–72.
6. Мавлюдов Б.Р. Таяние снега и льда на куполе Беллинсгаузен, остров Кинг-Джордж (Ватерлоо), Антарктика, в 2007–2011 гг. // Состояние природной среды Антарктики. Квартальный бюл. СПб.: РАЭ, 2011. № 2 (55). С. 61–64.
7. Мавлюдов Б.Р., Саватюгин Л.М., Соловьянова И.Ю. Реакция ледников Земли Норденшельда (арх. Шпицберген) на изменение климата // Проблемы Арктики и Антарктики. 2012. Вып. 1 (91). С. 67–77.
8. Мачерет Ю.Я., Москалевский Ю.Я. Строение и динамика выводного ледника Ледж, ледниковый купол о. Кинг-Джордж, Южные Шетландские острова, Антарктика // МГИ. 1999. Вып. 86. С. 102–106.
9. Орлов А.И. Географические исследования на полуострове Файлдс // Тр. САЭ. 1973. № 58. С. 184–207.
10. Фролов И.Е., Гудкович З.М., Карклин В.П., Смоляницкий В.М. Изменения климата Арктики и Антарктики – результат действия естественных причин // Проблемы Арктики и Антарктики. 2010. № 2 (85). С. 52–61.
11. Электронный ресурс www.aari.nw.ru.
12. D'Aleo J., Easterbrook D.J., Multidecadal tendencies in ENSO and global temperatures related to multidecadal oscillations // Energy & Environment. 2010. V. 21. № 5. P. 436–460.
13. Bintanja R. Glaciological and meteorological investigations on Ecology Glacier, King George Island, Antarctica (Summer 1990–1991) // Circumpolar Journ. 1992. V. 1–2. P. 59–71.
14. Braun M. Ablation on the ice cap of King George Island (Antarctica) – an approach from field measurements, modelling and remote sensing. Doctoral thesis at the Faculty of Earth Sciences. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Br., Riedlingen/Württ., 2001. 165 p.
15. Davies B.J., Carrivick J.L., Glasser N.F., Hambrey M.J., Smellie J.L. Variable glacier response to atmospheric warming, northern Antarctic Peninsula, 1988–2009 // Cryosphere. 2012. V. 6. № 5. P. 1031–1048.
16. Jonsell U.Y., Navarro F.J., Bañón M., Lapazaran J.J., Otero J. Sensitivity of a distributed temperature-radiation index melt model based on AWS observations and surface energy balance fluxes, Hurd Peninsular glaciers, Livingston Island, Antarctica // Cryosphere. 2012. V. 6. № 3. P. 539–552.
17. Mavlyudov B.R. Specific of snow accumulation and melting on two glaciers in Arctic and Antarctic // SCAR/IASC IPY open science conference (St. Petersburg, Russia, 8–11 July 2008). Abstract volume / Ed. A. Klepikov. St. Petersburg: AARI. 2008. P. 136.
18. Navarro F.J., Jonsell U.Y., Corcuera M.I., Martín-Español A. Decelerated mass loss of Hurd and Johnsons Glaciers, Livingston Island, Antarctica // Journ. of Glaciology. 2013. V. 59. № 213. P. 115–128.
19. Orheim O., Gonorukha L.S. Present-day glaciation in the South Shetland Islands // Annals of Glaciology. 1982. V. 3. P. 233–238.
20. Rückamp M., Braun M., Suckro S., Blindow N. Observed glacial changes on the King George Island ice cap, Antarctica, in the last decade // Global Planetary Change. 2011. V. 79. № 1–2. P. 99–109.
21. Wen J., Kang J., Han J., Xie Z., Liu L., Wang D. Glaciological studies on King George Island ice cap, South Shetland Islands, Antarctica // Annals of Glaciology. 1998. V. 27. P. 105–109.

Summary

Mass balance researches on Bellingshausen Ice Dome (King George Island, archipelago Southern Shetland Islands, Antarctica) were spent during five summer seasons in 2007–2012 and one winter in 2011. The analysis of received data has shown that in 2007/08 and 2008/09 ice mass balance on Bellingshausen Ice Dome was almost closed to zero, in 2009/10, 2010/11 and 2011/12 it was positive. ELA in 2007/08 and 2008/09 was situated a little below top of the Ice Dome (about 225 m a.s.l.), in 2009/10 ELA has lowered practically up to sea level, in 2010/11 it was equal 180 m a.s.l., in 2011/12 – 220 m a.s.l. Good correlation between snow and ice melting and mean summer air temperature give possibility to renew ice melting conditions for all period of observations at Bellingshausen weather station (1969–2011). Ice mass balance for Bellingshausen Ice Dome was also renewed for similar period. Analysis of received data allow to suppose that tendency of climate cooling is outlined in last years.